

ГАУССОВЫ ПРОЦЕССЫ ДЛЯ АНАЛИЗА КРИВЫХ БЛЕСКА ИЗ ОТКРЫТОГО КАТАЛОГА СВЕРХНОВЫХ

Т. А. Семенихин^{1,2}, М. В. Корнилов², М. В. Пружинская²

¹*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет
космических исследований,* ²*Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга*

В ходе работы из данных Открытого каталога сверхновых была сформирована выборка сверхмощных сверхновых (СН). При помощи векторных гауссовых процессов были получены аппроксимации многоцветных кривых блеска сверхмощных СН, попавших в выборку. Для трех объектов разных типов были построены и приведены к одной системе болометрические кривые блеска. Дана качественная интерпретация полученных результатов.

GAUSSIAN PROCESSES FOR LIGHT CURVE ANALYSIS FROM THE OPEN SUPERNOVA CATALOG

L. A. Semenikhin^{1,2}, M. V. Kornilov², M. V. Pruzhinskaya²

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research,* ²*Lomonosov Moscow State
University, Sternberg astronomical institute*

In this work we use data from the Open Supernova Catalog to make a sample of superluminous supernovae (SLSN). Using the vector Gaussian processes we approximate the multicolour light curves of chosen SLSNe. For three SLSNe from the sample, we construct the bolometric light curves and refer them to the same rest-frame. This allows to compare the light curves and to extract information about the progenitor.

Среди всех объектов, приведенных в Открытом каталоге сверхновых (ОКС [1]), особый интерес представляют так называемые сверхмощные сверхновые (СН). Это объекты, чья абсолютная звездная величина в максимуме блеска $M < -21^m$, а полная излучаемая энергия $E > 10^{51}$ эрг [2]. Таким образом, сверхмощные СН как минимум в 10 раз ярче, чем типичные сверхновые типа Ia, используемые в качестве индикаторов космологических расстояний [3, 4]. Для того чтобы лучше понять природу этих объектов, определить параметры предсверхновых и параметры взрыва, кроме многоцветных кривых блеска, желательно иметь и болометрические кривые блеска. Болометрические кривые блеска показывают, как поток от звезды, просуммированный по всему спектру излучения (по всем длинам волн), меняется со временем. Кроме того, имея болометрические кривые блеска для выборки сверхмощных сверхновых, их будет легче сравнить между собой, поскольку наблюдения для отдельных объектов часто представлены в разных фотометрических системах. Цель этой работы состоит в том, чтобы получить болометрические кривые блеска сверхмощных СН, используя данные из ОКС и векторные гауссовы процессы (ГП).

В ОКС содержатся фотометрические наблюдения сверхновых звезд в разных полосах пропускания (фильтрах). Представленные в каталоге ОКС многоцветные кривые блеска неоднородны по времени. Для получения квазиболометрической кривой блеска необходимо просуммировать потоки, измеренные в разных полосах. Поэтому имеющиеся кривые блеска нужно аппроксимировать. В данной задаче это сделано при помощи векторных ГП (<https://gp.snad.space/>).

Гауссовы процессы предполагают, что каждое значение кривой блеска — это случайная величина, индексированная временем. Определяя ковариационную матрицу процесса, мы можем найти условное математическое ожидание кривой блеска в интересующий нас момент времени. При формировании выборки были учтены следующие критерии: наличие хотя бы одного спектра, наблюдения в одной из фотометрических систем (*ugriz*, *u'g'r'i'z'*, *UBVRI*), наличие не менее трех полос пропускания. После учета этих критериев в нашей выборке осталось только 27 сверхмощных СН из 224 представленных в ОКС. Мы применили векторные ГП в соответствующих полосах пропускания к каждому объекту из выборки, получив тем самым непрерывные кривые блеска.

Для получения болометрических кривых блеска использовался метод, который предполагает, что в каждый момент времени спектр сверхновой может быть описан спектром черного тела (ЧТ) с определенной температурой:

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где I_ν — монохроматическая интенсивность излучения ЧТ; ν — частота излучения; T — температура ЧТ; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана; c — скорость света. Тогда видимая в определенной полосе пропускания звездная величина объекта в фотометрической системе АВ будет равна

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{R^2}{D^2} \frac{\int I_\nu \phi(\nu) (h\nu)^{-1} d\nu}{\int 3631 \text{Jy} \phi(\nu) (h\nu)^{-1} d\nu} \right), \quad (2)$$

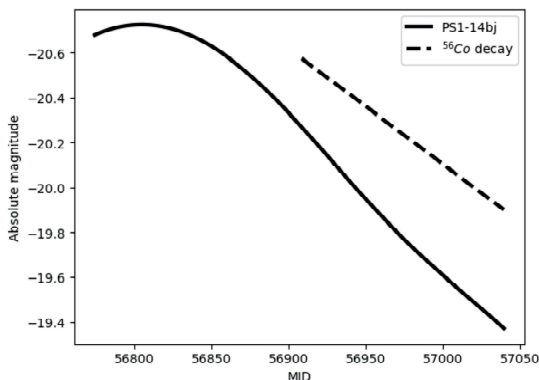
где $\phi(\nu)$ — кривая пропускания фильтра; R — радиус излучающего объекта; D — расстояние до объекта; $(h\nu)^{-1}$ предполагает, что детектор представляет собой устройство для счета фотонов. Для того чтобы определить в каждый момент времени параметры черного тела (T , R), используется метод наименьших квадратов:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{bands}} (m_{approx}^i - m_{model}^i(T, R)) \frac{\partial m_{model}^i(T, R)}{\partial T} = 0, \\ \sum_{i=1}^{N_{bands}} (m_{approx}^i - m_{model}^i(T, R)) \frac{\partial m_{model}^i(T, R)}{\partial R} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь m_{approx}^i — видимая в i -й полосе пропускания звездная величина, полученная нами при помощи ГП; $m_{model}^i(T, R)$ — видимая в i -й полосе пропускания звездная величина модели ЧТ с параметрами T , R ; N_{bands} — количество полос пропускания для данного объекта. Численно решая систему уравнений (3), мы получаем параметры ЧТ, благодаря чему можем посчитать модельную светимость ЧТ в каждый момент времени по формуле

$$L = 4\pi R^2 \int I_\nu(T) d\nu. \quad (4)$$

При помощи аппроксимированных нами многоцветных кривых блеска можно достаточно точно оценить температуру и радиус черного тела в данный момент времени и рассчитать болометрическую кривую блеска. На рисунке представлена болометрическая кривая блеска для сверхмощной сверхновой PS1-14bj. При построении кривой блеска были учтены красное смещение и межзвездное поглощение в Галактике. Также для того, чтобы объяснить болометрическую кривую блеска исследуемой сверхновой, на графике приведена кривая, обусловленная радиоактивными распадами ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$). Видно, что наклоны кривых слабо отличаются, поэтому радиоактивные распады, возможно, могут быть источником энергии взрыва PS1-14bj, что, однако, не исключает объяснение наблюдаемых кривых блеска с помощью других механизмов [5, 6].



Болометрическая кривая блеска сверхмощной сверхновой PS1-14bj, полученная из многоцветных кривых блеска в предположении, что в каждый момент времени спектр объекта является чернотельным

Модель черного тела имеет плохое приближение в основном в тех диапазонах длин волн, где наблюдаются линии поглощения. Спектры сверхмощных СН имеют слабые линии поглощения, кроме ультрафиолетового диапазона. Наиболее сильные отклонения спектра от модели черного тела наблюдаются в ультрафиолетовой части при высокой температуре [7]. Поэтому поправки модели черного тела для ультрафиолетового диапазона будут следующим этапом в нашей работе. Затем планируется получить болометрические кривые блеска для всех оставшихся объектов из сформированной выборки, а также, используя теоретические и аналитические модели, извлечь из болометрических кривых блеска информацию о параметрах предсверхновых и параметрах взрыва, что поможет лучше понять их астрофизическую природу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта № 21-52-15024, а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

Библиографические ссылки

- [1] *Guillochon J., Parrent J., Kelley L. Z., Margutti R.* An Open Catalog for Supernova Data // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 835, № 1. — P. 64. 1605.01054.
- [2] *Moriya T. J., Sorokina E. I., Chevalier R. A.* Superluminous Supernovae // *Space Science Reviews.* — 2018. — Vol. 214, № 2.
- [3] *Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al.* Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astron. J.* — 1998. — Vol. 116, № 3. — P. 1009–1038. [astro-ph/9805201](#).
- [4] *Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // *The Astrophysical Journal.* — 1999. — Vol. 517, № 2. — P. 565–586.
- [5] *Gal-Yam A.* The Most Luminous Supernovae // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* — 2019. — Vol. 57, № 1. — P. 305–333.

- [6] *Wang S.-Q., Wang L.-J., Dai Z.-G.* The Energy Sources of Superluminous Supernovae // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2019. — Vol. 19, № 5. — P. 063.
- [7] *Angus C. R., Smith M., Sullivan M. et al.* Superluminous supernovae from the Dark Energy Survey // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2019. — Vol. 487, № 2. — P. 2215–2241.
<https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/487/2/2215/28791944/stz1321.pdf>.